第 38 卷第 6 期 2018 年 3 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.6 Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201703310561
美尔汗·黑扎特,郝兴明.塔里木河下游胡杨群落 CO_2 通量特征与水分利用效率.生态学报,2018,38(6):2048-2055.
Meierhan HEIZAT,Hao X M.CO_2 flux characteristics and water use efficiency of the *Populus euphratica* community in the lower reaches of Tarim River.Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):2048-2055.

塔里木河下游胡杨群落 CO_2 通量特征与水分利用效率

美尔汗·黑扎特[1,2],郝兴明[2,*]
1 新疆师范大学生命科学学院,乌鲁木齐 830054
2 中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐 830011

摘要:以极端干旱环境中的胡杨群落为研究对象,利用涡度相关通量观测系统,研究了胡杨群落 CO_2 通量与水分利用效率在不同物候期的动态规律。结果表明:胡杨 CO_2 通量在不同物候期日变化趋势基本一致,但存在明显的季节差异,其中果熟期 CO_2 通量变化幅度最大,开花期最小,展叶期介于二者之间。相关分析表明,胡杨群落 CO_2 通量均与显热通量、潜热通量、动量通量、土壤热通量、净辐射以及空气相对湿度呈极显著相关。其中,净辐射、潜热通量和显热通量与 CO_2 通量的相关系数较大,其变化范围分别为-0.82—-0.88、-0.64—-0.66 和-0.63—-0.94,是影响群落 CO_2 通量的最主要环境因子。胡杨群落水分利用效率(WUE)同样存在明显日变化规律。其时间动态表现为:群落水分利用效率在开花期、叶黄期和落叶期变化幅度大,开花期最高,在展叶期和果熟期 WUE 最稳定。净辐射和风速是影响群落水分利用效率的两个最关键要素。

关键词:干旱区;胡杨;二氧化碳通量;气象因素;水分利用效率

CO_2 flux characteristics and water use efficiency of the *Populus euphratica* community in the lower reaches of Tarim River

Meierhan HEIZAT[1,2],HAO Xingming[2,*]
1 *College of Life Science,Xinjiang Normal Universtiy,Urumqi* 830054,*China*
2 *Stake Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology,Xinjiang Institute of Ecology and Geography,Chinese Academy of Sciences,Urumqi* 830011,*China*

Abstract: Made the *Populus euphratica* communities as the research object in the extreme drought environment the CO_2 flux characteristics and water use efficiency(WUE)during different phenological phases of *P. euphratica* were studied using the eddy covariance flux observation system. The results showed that the daily variations in the CO_2 flux trends were basically identical in different phenological phases of *P. euphratica*, but there were obvious seasonal differences. The change amplitude ofchange in CO_2 flux rate at the maturity stage was the largest, and was the smallest at the flowering stage, and medium at the foliation stage. Correlation analysis showed that the CO_2 flux rate of *P. euphratica* community was significantly correlated with the sensible heat flux, latent heat flux, momentum flux, soil heat flux, net radiation and relative humidity of the air. Among them, net radiation, and latent and sensible heat fluxes were more highly related with the CO_2 fluxs, The scope of change, i. e, -0.82—-0.88、-0.64—-0.66 and -0.63—-0.94, respectively, the main environmental factor affecting the CO_2 rate of the community. Thus this study shoued an obvios daily change in water use efficiency of the *P. euphratica* community. The dynamic performance of WUE of the community time was as follows: water use efficiency varied greatly at the flowering stage, leaf coloration stage, and defoliation stage, and was the highest at the flowering stage, most stable at the foliation and maturity stages. Two of the most critical factors affecting the communities were net radiation and wind speed.

基金项目:国家自然科学基金(41571109)
收稿日期:2017-03-31; **修订日期**:2017-12-04
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: haoxm@ms.xjb.ac.cn

Key Words: arid areas; *Populus euphratica*; CO_2 flux; meteorological factors; water use efficiency

在陆地生态系统中,碳、水循环是陆地表层生态系统物质和能量循环的核心,也是地气间能量循环相互作用的纽带。然而,人类活动带来的化石燃料排放、水泥生产、土地利用变化等导致了全球气候变化和温室气体浓度的增加,淡水资源的短缺及污染等[1]。因此,在过去的几十年里生态系统的碳循环与水资源问题引起世界各国的专家们的关注[2-3]。干旱区和半干旱地区占全球陆表面的 30%—45%[4-5],是属于典型脆弱类型的陆地生态系统,它在碳汇和生物地球化学循环方面也发挥着不可替代的作用。

塔里木河是我国典型的干旱沙漠区域,生态环境脆弱,植被种类贫乏,结构单纯,主要建群种是胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)。塔里木河流域的胡杨林占世界和中国胡杨林总面积的 54%和 89%,对维持荒漠生态系统的防风固沙及保护自然环境等方面起到了重要作用。而水分是荒漠区主要的限制因子,控制植物的生长以及植被演替等重要过程[6],因此开展极端干旱区植被水分利用效率的研究,对预测未来植被变化规律和管理植被群落具有重要意义。

长期以来,极端干旱区荒漠河岸林群落碳通量的研究主要集中在土壤碳库动态及其影响因素等方面[7],相关研究观测时间较短,需要长期观测来解释其规律。同时,有关该地区胡杨群落尺度水分利用效率研究也较少。因此,本研究以塔里木河下游典型胡杨群落为研究对象,利用涡动协方差观测系统进行了长期观测。基于观测数据系统分析了该区域胡杨群落二氧化碳通量与水分利用率在不同物候期的变化规律及其与气象要素的关系。研究结果将有助于准确了解荒漠河岸林植被的 CO_2 通量变化特征、水分利用效率状况,并为该区域生态保育和生态恢复提供重要的参考依据。

1　研究地区概况与研究方法

1.1　研究地区概况

研究区位于在塔里木河下游英苏断面附近(图 1),地理位置为 40°28′2.3″N,87°51′27.4″E,海拔高度 842 m,年平均降水量变化在 17.4—42.0 mm,降水稀少,蒸发强烈,气候为干燥,多大风天气。观测样地为地势相对平坦,地下水位大致在 3.8—4.5 m 之间土壤,以砂土(0—100 cm 深度)和沙壤土(100—200 cm 深度)为主分。由于其特殊的地理环境及物种组分,研究区的物种脆弱性和不稳定性较强,天然植被种类较单一、因此该观测区分布的主要建群种有胡杨(*P. euphratica*),多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)等。

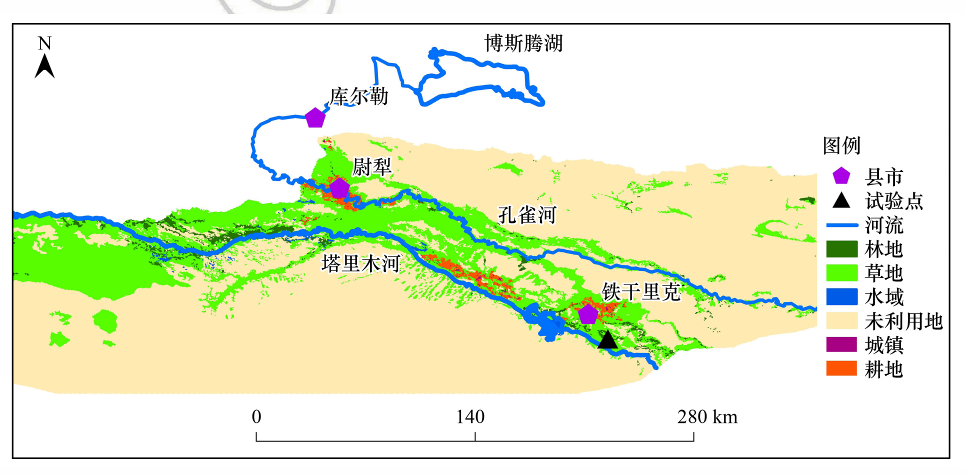


图 1　研究区位置示意图

Fig.1　Location of study area

1.2　试验设计

本试验在下垫面平坦、均一的胡杨冠层上方架设开路式涡度相关系统(OPEC EC150)(Campbell Scientific

Ltd.,Logan,UT,USA)进行数据观测,通量塔高度为 15 m,四周均为胡杨林群落平均树高 8—10 m,盖度该地区的 50%左右。此高度基本可以代表下垫面 1 km^2范围内的情况。系统主要传感器包括 EC150 开路式 CO_2、水汽分析仪、CSAT3A 三维超声风速仪等。通量数据由涡度相关系统与辅助气象要素梯度监测系统同步测定,梯度观测系统由数据采集器、温度传感器、四分量净辐射传感器、自动雨量计和温、湿度传感器组成。TCAV 土壤热电偶传感器和 HFP01 土壤热通量板观测地表温度以及地表以下 5 cm 和 8 cm 处的土壤温度与土壤热通量。通过开路式涡度相关系统自动获取的 10 Hz 实时数据均由采集器(CR3 000)的内置程序进行 WPL 校正、计算及储存,进行全天 24 h 的实时监测,可将获取 30 min 的平均 CO_2通量(Fc)、潜热通量(LE)和感热通量(Hs)等通量数据。试验数据为 2016 年胡杨生长季数据,选择胡杨物候期分别[8]:开花期(2016 年 3 月 29 日—2016 年 4 月 19 日)、展叶期(2016 年 4 月 4 日—2016 年 4 月 6 日)、果熟期(2016 年 5 月 25 日—2016 年 10 月 13 日)、叶黄期(2016 年 9 月 26 日—2016 年 10 月 28 日)、落叶期(2016 年 10 月 11 日—2016 年 11 月 12 日),其中 2016 年 3 月 22 日—2016 年 4 月 5 日及 2016 年 9 月 26 日—2016 年 10 月 14 日,由于仪器故障,该段时间内数据缺测。

1.3 数据处理

本文使用 EXCEL 软件对 2016 年 3—11 月胡杨生长季的通量数据与同步气象资料的观测数据进行分析。在做长时间序列的通量分析前,先对由于恶劣天气及太阳能板供电不足、仪器故障等原因造成的不合理的原始数据需要进行野点剔除,对缺失数据进行插补。目前常用的数据插补方法有归法、多重填补法以及神经网络法等[9-11]。本研究并采用平均日变化法“MDV”插补缺失数据[12],MDV 法通常是依据通量的日变化而进行规律变化的,当某天某一时刻的数据缺失时,可以用相邻几天的有观测数据的结果平均值代替。最后采用 Microsoft Excel、SPSS、DPS 和 Sigmaplot 等统计分析软件完成。

2 研究方法

在目前的研究中,测量涡度相关通量的原理是基于 Burba 和 Andersen 假定理论如下[13-14]:涡度相关的基本原理测量的是可以计算出垂直通量协方差之间的实体浓度(CO_2等)和垂直风速的脉动。在湍流垂直通量可以表示为:

$$F = \overline{\rho_a w s} \quad (1)$$

F 表示物质的通量,ρ_a 为空气密度(kg/m^3),w 为垂直风速度(m/s)和 s 为物理属性(如密度和温度)。涡度相关系统的重要采取的方法是地形应均匀平面(即密度波动和平均垂直的流动被认为可以忽略不计)。这些假设定义意味着涡度相关系统通量约等于空气密度 ρ_a 和瞬时协方差垂直风速度(w')和标量混合率的脉动值 s'之间的偏差。

$$F = \overline{\rho_a' w' s'} \quad (2)$$

因此,CO_2通量是瞬时垂直风速度和空气中 CO_2的密度协方差之间的偏差即表示为:

$$Fc = \overline{w' \rho_c'} \quad (3)$$

显热通量等于平均空气密度乘以瞬时垂直风速度和温度偏差之间的协方差表示为:

$$H = \rho_a c_p \overline{w' T'} \quad (4)$$

潜热通量计算以类似的方式表示为:

$$LE = \lambda \overline{\rho_a' w q'} \quad (5)$$

动量通量计算公式表示为:

$$T = -\overline{\rho_a' u' w'} \quad (6)$$

式中,c_p 是空气的定压比热常数,λ 为蒸发潜热,u' 为水平风速,w' 垂直风速,T' 温度,q' 比湿脉动值;ρ_a'、ρ_c' 分别为空气、CO_2密度脉动值。

水分利用效率是陆地生态系统生产力与生态系统蒸散的比值,为此,WUE 可表达为:

$$WUE = Y/ET \quad (7)$$

式中,WUE 产量水平的水分利用效率;Y 产量(CO_2净交换量计算);ET 为生态系统蒸散量(由潜热通量计算),最终单位为 g/g。二氧化碳通量和潜热通量均在 0 值附近,此时的 Fc 与 ET 的比值很大或者很小,但这并不能说明生态系统 WUE 很大或者很小[15-16]。所以采用 08:00—17:00 的数据来计算并分析 WUE 的变化。

3　结果与分析

3.1　胡杨群落 CO_2 通量变化规律

胡杨 CO_2 通量在各个物候期具有明显的时间变化规律。图 2 结果表明胡杨群落 CO_2 通量在不同的物候期都具有相同的日变化趋势。一般在 20:00 点左右至次日 8:00 点,由于植物呼吸作用放出 CO_2,CO_2 通量值为正直,呈现为碳源效应。与此相反,在 8:00 点至 20:00 之前,因为光合作用,冠层吸收 CO_2,CO_2 通量值为负值,呈现为碳汇效应[17]。尽管胡杨群落 CO_2 通量具有相同的日变化趋势,但在不同的物候期日变化幅度具有显著差异,尤其进入生长季,CO_2 通量的变化幅度明显增大。胡杨开花期、展叶期、果熟期、叶黄期和落叶期白天最大吸收通量值分别为:-0.19、-0.27、-0.36、-0.27 mg $m^{-2}s^{-1}$ 和-0.12 mg m^{-2} s^{-1},表明 CO_2 通量的叶面积指数与光合作用有密切的关系;同期夜间最大排放通量值分别为:0.03、0.07、0.05、0.02、0.06 mg m^{-2} s^{-1}。图 2 反映了胡杨在不同物候期 CO_2 通量的变化规律,负值表示向下的通量,值越小表示植物被吸收的 CO_2 越多,产生的干物质越多,干物质的积累从开花期开始明显增长,在果熟期最大,到了落叶期由开始下降,最后 CO_2 通量值为正直。其中在开花期有峰值出现,是因为在此时有沙尘暴,最大风速达到 9.87 m/s,影响了 CO_2 的吸收。图 2 胡杨冠层 CO_2 通量季节变化,CO_2 通量在开花期开始增加,果熟期最高,此时的生物量最高,之后开始下降落叶期为最低。

3.2　胡杨群落 CO_2 通量影响因素分析

本研究主要从能量与水汽条件角度分析了胡杨群落 CO_2 通量的主要影响因素。相关分析结果表明(图 3),不论在生长季还是在非生长季,胡杨群落 CO_2 通量均与显热通量、潜热通量、动量通量、土壤热通量、净辐射以及空气相对湿度呈极显著相关关系。但从相关系数大小来看,净辐射、潜热通量和显热通量与群落 CO_2 通量的相关系数较大,分别为-0.82—-0.88、-0.64—-0.66 和-0.63—-0.94。显然,净辐射、潜热通量和显热通量是影响群落 CO_2 通量的最主要环境因子。这表明在群落尺度上,群落吸收太阳辐射能量的多少,群落的蒸散发强度以及环境热量状况和温度条件是影响群落 CO_2 吸收的关键要素。需要指出的是,除了非生长季潜热通量、土壤热通量与胡杨群落 CO_2 通量表现为正相关关系之外,其他时段上述环境要素与胡杨群落 CO_2 通量都表现为负相关关系。

从不同物候期胡杨群落 CO_2 通量与上述环境要素相关性来看(图 3),空气相对湿度和土壤热通量与胡杨群落 CO_2 通量表现为正相关,而其余环境要素则总体上与 CO_2 通量表现为一致的负相关关系。从开花期至落叶期,胡杨群落 CO_2 通量与净辐射、显热通量、动量通量以及空气相对湿度的相关系数大小总体上表现为先减小后逐步增加,至落叶期达最大的变化趋势。潜热通量与 CO_2 通量的关系相对复杂,在开花期至果熟期它与 CO_2 通量表现为负相关,且相关系数表现为逐步增大的趋势;在叶黄期和落叶期,潜热通量与 CO_2 通量的相关性却负相关逆转为正相关关系。这表明在胡杨生长活跃期群落蒸散量越大,吸收固定的 CO_2 越多,而在生长末期和非生长季群落蒸散量越大,则意味着释放的 CO_2 越多。土壤热通量虽与 CO_2 通量具有极显著相关关系,但二者之间相关系数最低(最大仅为 0.136),因此,它对 CO_2 通量的贡献非常有限。与其类似动量通量同样对 CO_2 通量贡献较低,但是它的作用主要体现在生长末期和非生长季。

3.3　胡杨群落水分利用效率变化特征

水分利用效率(water use efficiency,WUE)是陆地生态系统生产力与生态系统蒸散的比值,它不仅是陆地生态系统碳循环和水循环的重要组成部分,而且能够反映陆地生态系统植被对水分的利用能力。图 4 为胡杨

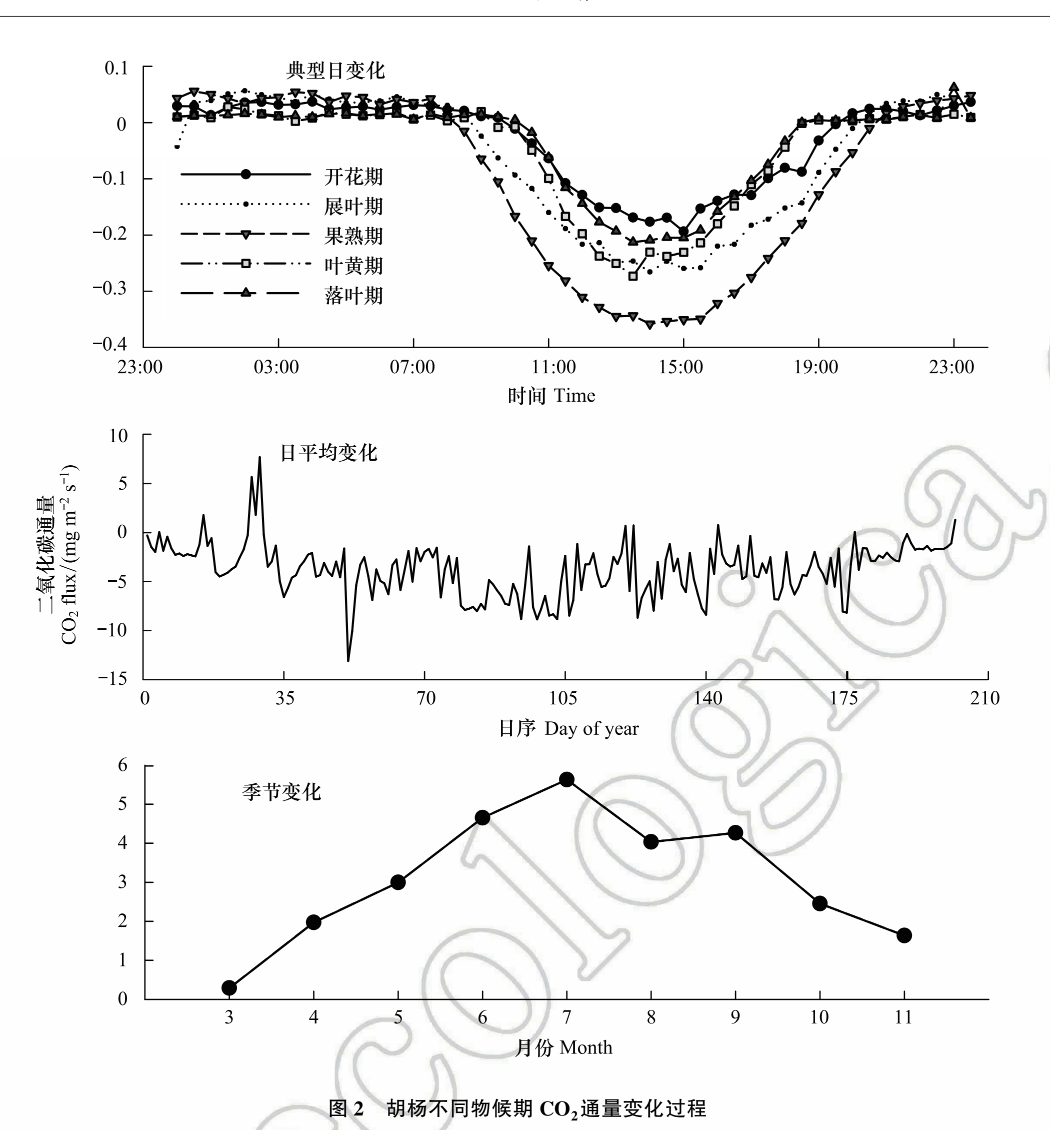


图 2 胡杨不同物候期 CO_2 通量变化过程

Fig.2 Variation of CO_2 flux in different phenological phase of *P. euphratica*

在不同物候期 8:00—17:00 时间段内的水分利用效率日变化规律。从图中可知在生长季展叶期和果熟期 WUE 变化相对平缓,变化规律基本相似,峰值主要出现在清晨和傍晚,从 8:00 开始下降,到 10:00 左右以后保持平稳变化,直到 17:00。而开花期 WUE 波动幅度较大,变化复杂,从 8:00 开始下降,15:00 达到最高值为 0.055g/g,之后开始降低。叶黄期和落叶期比开花期、展叶期、果熟期变化差异大,WUE 的值较高,从早上 8:00开始下降,到 10:00 是为最低值,随后开始上升,是因为在此期生态系统光合作用弱,胡杨叶片衰老,因此 WUE 也明显较高。研究发现蒸散量或降水量影响植被的水分利用效率[18-19],图 5 反应胡杨群落在生长季水分利用效率与蒸散量的关系,可以看出在开花期水分利用率变化复杂,呈多峰曲线,是因为在开花期蒸散量较低,保持在 0—1 之间,生态系统光合作用弱,其次该地区气候极端干旱,在春季沙尘暴巨多,受到恶劣天气的影响;之后 WUE 随着蒸散量(*ET*)的增加反而变小,这是由于进入果熟期后,气温升高,*ET* 随之增加,光合作用为强烈,导致 WUE 为低值[20]。

胡杨群落水分利用效率(WUE)受到环境因子的显著影响(表 1)。在展叶期、果熟期、叶黄期、落叶期 WUE 与各环境因子的相关性显著,其中 WUE 与气温、风速、湿度、饱和水汽压差、水蒸汽压相关性为显著,而在生长季 WUE 与风速和净辐射的相关性达到极显著,可知在生长季风速和净辐射是影响该地区胡杨水分利用率的主要环境因素。然而,在开花期 WUE 与各环境因素的相关性不显著,其原因可能为开花期太阳辐射弱,胡杨的光合作用不强。

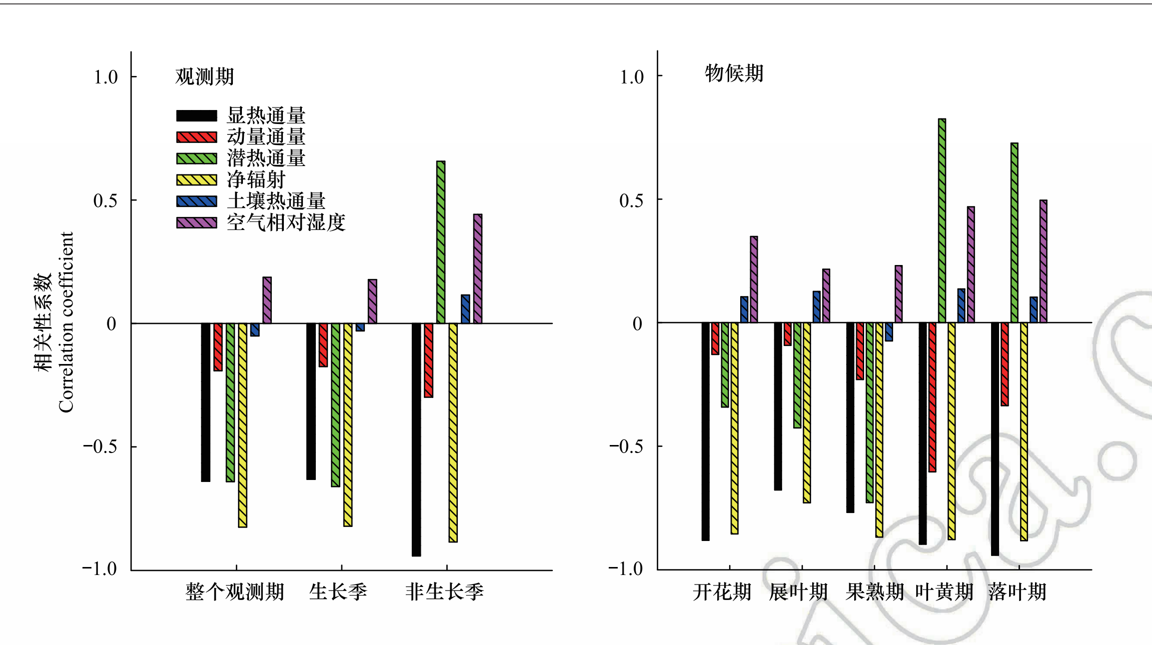


图 3　胡杨群落 CO_2 通量的主要影响因素

Fig.3　The main infuluencing factors of CO_2 flux in the *P. euphratica* community

4　讨论与结论

4.1　讨论

胡杨 CO_2 通量在各个物候期具有明显的日化规律,且不同物候期 CO_2 通量日动态呈"U"型曲线,这与前人的大多数研究结果一致[21-22]。如杨娟等[23]指出,克氏针茅草原生态系统的 CO_2 通量日变化是典型的单峰型,夜间 CO_2 通量为正值,日出后迅速转为负值。林同保[24]等研究发现,冬小麦在各生育期的 CO_2 通量日变化变化幅度不同,灌浆前期为最高,返青期最低。而本试验结果发现胡杨 CO_2 通量在各个物候期变化幅度具有显著差异性,这与胡杨各物候期的光合能力密切相关,在生长季净辐射也接近于全年最高水平,因此在果熟期幅度最大,开花期和叶黄期的 CO_2 通量较小。

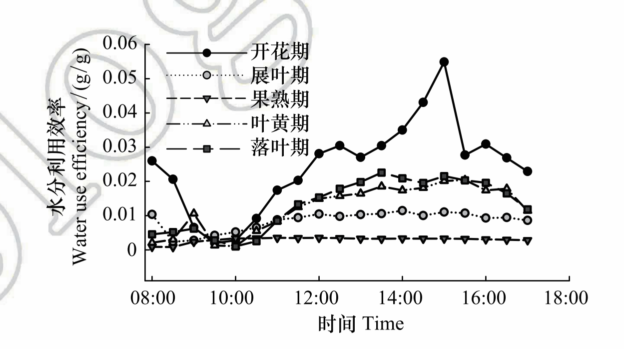


图 4　胡杨不同物候期水分利用效率平均日变化过程

Fig.4　Mean daily variation of water use efficiency in different phenological phase of *P. euphratica*

目前,国内外对 CO_2 通量及其影响因子方面的研究不少,影响因子也多局限在温度和湿度等。已有研究表明,CO_2 通量与气象因素的关系是由视地区和环境而异,王文雅[25]等对锡林浩特草原 CO_2 通量影响因素进行了分析,认为 CO_2 通量日变化主要受温度和有效辐射影响,而季节变化主要受到降水和土壤含水量的影响。刘冉[16]等运用涡度相关系统对原始原生荒漠的地表 CO_2 通量进行了连续观测,发现净辐射通量、潜热通量和 CO_2 通量都具有明显的季节变化趋势,但显热通量的季节变化不明显。而本研究发现净辐射、潜热通量和显热通量是影响群落 CO_2 通量的最主要环境因子。表明在群落尺度上,群落吸收太阳辐射能量的多少,群落的蒸散发强度以及环境热量状况和温度条件是影响群落 CO_2 吸收的关键要素。

水分利用效率不仅是陆地生态系统碳循环和水循环的重要组成部分,能够反映陆地生态系统植被对水分的利用能力[20]。WUE 具有明显的时空变化,在不同季节、不同时辰是存在差异。樊巍等[26]的研究表明,WUE 随着植物的生育期而变化,冬小麦在灌浆前期水分利用效率较高,后期则较低。而本研究发现胡杨在开花期的 WUE 最高,在展叶期和果熟期 WUE 下降至最低,是因为在非生长季胡杨林光合作用弱,水分利用率较高。植物在生态系统 WUE 不仅受到系统内部植被类型、群落结构等因素影响,还受到外界因素的影响,包

括光照、水分、空气温度、叶片湿度、饱和差、CO_2、降水等因素,但对 WUE 影响幅度不同。贺伟[27]等认为 CO_2 浓度、气温和降雨则是影响生态系统 WUE 的关键气候变化因子,而 Farquhar[28]等此认为光照和水分是植物 WUE 的主要因子,此外研究发现蒸散量或降水量影响植被 WUE 的因素。本研究结果显示在不同物候净辐射和 CO_2 通量是影响期胡杨群落 WUE 的主要因素,这是因为净辐射和 CO_2 通量直接影响植物光合作用,在生长季净辐射过高会影响植物水分的利用。影响植物 WUE 除了外界因子之外,还与植物内在的叶水势、光合速率、气孔等途径有关。

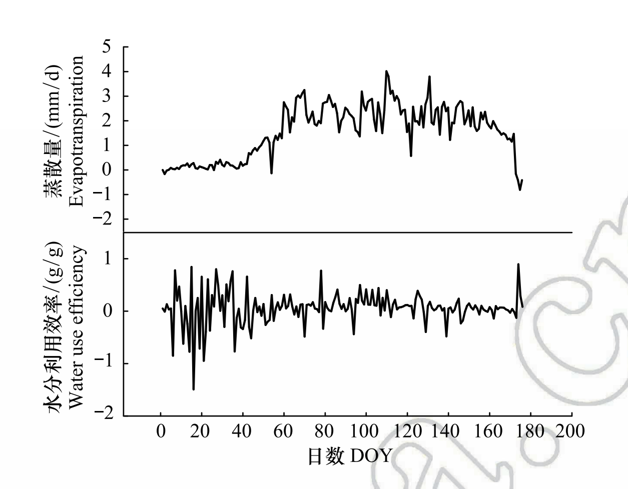


图 5 胡杨群落水分利用率生与蒸散量之间的关系

Fig.5 Relationship between water use efficiency and evapotranspiration in the *P. euphratica* community

4.2 结论

(1)胡杨群落 CO_2 通量具有显著的日变化特征,总体呈现"U"型变化趋势。白天群落 CO_2 通量为负,表现为 CO_2 的吸收过程;夜间则逆转为正,为 CO_2 的释放过程。但在不同物候期 CO_2 通量日变化幅度表现出显著差异性,其中果熟期 CO_2 通量幅度最大,开花期和叶黄期的 CO_2 通量较小。

表 1 胡杨不同物候期水分利用效率与各环境因子的相关关系

Table 1 The correlation between water use efficiency and various environmental factors in different phenological phase of *P. euphratica*

物候期 Phenological phase	开花期 Flowering stage	展叶期 Foliation stage	果熟期 Maturity stage	叶黄期 Leaf coloration stage	落叶期 Defoliation stage
气温 Air temperature/℃	0.131	−0.671**	−0.592**	0.296*	0.537**
风速 Wind speed/(m/s)	0.101	0.704**	0.789**	0.415**	0.170
相对湿度 Relative humidity/%	0.160	0.571**	0.493**	−0.225	−0.459**
水蒸汽压 Water vapor pressure/kPa	0.133	0.672**	0.595**	−0.293*	−0.534**
净辐射 Net radiation/(w/m^2)	0.026	−0.841**	−0.845**	0.516**	0.864**
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit/kPa	0.118	−0.728**	−0.675**	0.385**	0.639**

"**"表示相关性达极显著水平 $P<0.01$;"*"表示相关性达显著水平 $P<0.05$

(2)从能量与水汽条件角度分析了胡杨群落 CO_2 通量的主要影响因素。结果表明:不论在生长季还是在非生长季,胡杨群落 CO_2 通量均与显热通量、潜热通量、动量通量、土壤热通量、净辐射以及空气相对湿度呈极显著相关关系。其中,净辐射、潜热通量和显热通量与群落 CO_2 通量的相关系数较大是影响群落 CO_2 通量的最主要环境因子。土壤热通量和动量通量虽与 CO_2 通量具有极显著相关关系,但它们之间相关系数较低,对 CO_2 通量的贡献非常有限。

(3)不同物候期胡杨群落水分利用效率(WUE)同样表现出明显日变化规律。开花期 WUE 最高,变化幅度大,其次为叶黄期和落叶期。虽然在展叶期和果熟期 WUE 下降至最低,但却表现的最为稳定。在不同物候净辐射和风速是影响期胡杨群落 WUE 的主要因素。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 1-996.

[2] Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, van der Plichtt. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. Nature, 1995, 375(6533): 666-670.

[3] Artuso F, Chamard P, Piacentino S, Sferlazzo D M, De Silvestri L, di Sarra A, Meloni D, Monteleone F. Influence of transport and trends in atmospheric CO_2 at Lampedusa. Atmospheric Environment, 2009, 43(19): 3044-3051.

[4] Liu H Z, Tu G, Fu C B, Shi L Q. Three-year variations of water, energy and CO_2 fluxes of cropland and degraded grassland surfaces in a semi-arid area of northeastern China. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(6): 1009-1020.
[5] 胡隐樵,张强. 开展干旱环境动力学研究的若干问题. 地球科学进展,2002,16(1):18-23.
[6] 熊伟,王彦辉,于澎涛. 树木水分利用效率研究综述. 生态学杂志,2005,24(4):417-421.
[7] 黄湘,陈亚宁,李卫红,刘加珍,陈亚鹏. 塔里木河中下游柽柳群落土壤碳通量及其影响因子分析. 环境科学,2006,27(10):1934-1940.
[8] 买尔燕古丽·阿不都热合曼,艾里西尔·库尔班,阿迪力·阿不来提,热合木都拉·阿迪拉,段含明,阿不都米吉提·阿布利克木,玉米提·哈力克. 塔里木河下游胡杨物候特征观测. 干旱区研究,2008,25(4):525-530.
[9] Ooba M, Hirano T, Mogami J I, Hirata R, Fujinuma Y. Comparisons of gap-filling methods for carbon flux dataset: a combination of a genetic algorithm and an artificial neural network. Ecological Modelling, 2006, 198(4): 473-486.
[10] 刘冉,李彦,王勤学,许皓,郑新军. 盐生荒漠生态系统二氧化碳通量的年内、年际变异特征. 中国沙漠,2011,31(1):108-114.
[11] 杨洁,刘冉,马杰,唐立松,李彦. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落土壤呼吸对生态系统呼吸的贡献. 中国沙漠,2016,36(3):726-733.
[12] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 71-77.
[13] Anderson D E, Verma S B. Carbon dioxide, water vapor and sensible heat exchanges of a grain sorghum canopy. Boundary-Layer Meteorology, 1986, 34(4): 317-331.
[14] Burba G, Anderson D. Introduction to the Eddy Covariance Method: General Guidelines and Conventional Workflow. Lincoln, USA: LI-COR Biosciences, 2007: 1-141.
[15] Zhu Z L, Sun X M Zhang R H, Su H B Tang X Z. Rapid measurements of CO_2 flux density and water use efficiency of crop community. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9): 1684-1686.
[16] 刘冉,王勤学,唐李松,李彦. 盐生荒漠地表水热与二氧化碳通量的季节变化及驱动因素. 生态学报,2009,29(1):67-75.
[17] 窦军霞,刘伟东,苗世光,李炬. 北京城郊地区二氧化碳通量特征. 生态学报,2015,35(15):5228-5238.
[18] 马赟花,张铜会,刘新平,毛伟,岳祥飞. 极端降水事件对科尔沁沙地一年生植被的影响. 中国沙漠,2016,36(1):50-56.
[19] 米兆荣,陈立同,张振华,贺金生. 基于年降水、生长季降水和生长季蒸散的高寒草地水分利用效率. 植物生态学报,2015,39(7):649-660.
[20] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,赵先丽,张玉书. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应. 生态学报,2015,35(9):2902-2909.
[21] 莫兴国,陈丹,林忠辉,项月琴. 不同水分条件下麦田能量与 CO_2 通量变化特征研究. 中国生态农业学报,2003,11(4):77-81.
[22] 郭家选,李玉中,梅旭荣. 冬小麦农田尺度瞬态 CO_2 通量与水分利用效率日变化及影响因素分析. 中国生态农业学报,2006,14(3):78-81.
[23] 杨娟,周广胜,王云龙,王玉辉. 内蒙古克氏针茅草原生态系统——大气通量交换特征. 应用生态学报,2008,19(3):533-538.
[24] 林同保,王志强,宋雪雷,曲奕威,孟战赢冬小麦农田二氧化碳通量及其影响因素分析. 中国生态农业学报,2008,16(6):1458-1468
[25] 汪文雅,郭建侠,王英舜,武魁. 锡林浩特草原 CO_2 通量特征及其影响因素分析. 气象科学,2015,35(1):100-107.
[26] 樊巍. 农林复合系统的林网对冬小麦水分利用效率影响的研究. 林业科学,2000,36(4):16-20.
[27] 贺伟,布仁仓,熊在平,胡远满. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. 生态学报,2013,33(2):519-531.
[28] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Garbon isotope discrimination and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40: 503-537.